



토양 중 불소 관리현황 및 개선방안

김 경 민

요 약

□ 토양광물의 구성물질 중 하나인 자연기원 불소가 토양오염물질로 관리됨에 따른 갈등이 증가하고 있음

- 토양 중 자연기원 불소는 지하수나 하천으로의 이동이 어렵고 위해성이 극히 낮음에도 우리나라 「토양환경보전법」에서는 자연기원 불소가 우려기준을 초과하기만 하면 정화조치하도록 하고 있음
- 최근 환경부는 이러한 갈등을 해결하기 위해 현행 우려기준을 두 배로 완화하는 대책을 마련하였음

□ 해외 주요국은 자연기원과 인공기원 불소를 분리하여 관리하고 있는데 일본을 제외한 나라는 자연기원 불소에 대한 정화기준치를 설정하지 않고 있는 반면, 인공기원 불소의 규제는 강화해 나가고 있음

- 자연기원 불소를 정화하는 일본조차도 토양오염 범위에서 자연기원 불소는 배제시키고 있으며, 정화기준은 지하수로의 영향을 부지별로 평가하여 정하도록 하고 있음
- 해외는 토양뿐 아니라 다른 물환경, 대기, 폐기물, 식물 등에서 인공기원 불소에 대한 규제를 강화하고 있음

□ 토양 중 불소에 대한 정화규제를 합리적으로 관리하기 위해서는 불소를 기원별로 분리하고, 지하수뿐 아니라 물환경, 폐기물, 식물과의 통합적인 연계방안이 필요함

- ①불소의 기원에 따른 분리 관리, ②정화기준과 구별되는 토양환경기준의 마련, ③토양 위해성평가 개선 마련이 필요함

- 01 I. 들어가며
- 02 II. 토양 중 불소 개관
- 05 III. 국내 토양 중 불소 관리현황
- 12 IV. 해외 주요국의 토양 중 불소 관리현황
- 18 V. 토양 중 불소의 합리적 개선 방안
- 22 VI. 나가며



I. 들어가며

환경부는 2024년 12월 12일 「토양환경보전법 시행규칙」을 일부 개정하여 불소에 대한 토양 오염우려기준을 완화하였다.¹⁾ 환경부의 개정은 지난해 국무총리실 규제심판부가 선진국에 비해 엄격한 ‘토양 내 불소 정화규제’를 인체나 생태계에 위해가 없는 범위 내에서 합리적으로 개편하도록 권고²⁾한 내용을 반영한 것이다. 권고 당시 환경부는 불소 기준의 적절성을 재검토하여 국외 기준 및 시험방법 조사, 국내 불소 배경농도 수준 분석, 위해성평가 등의 과학적 조사를 진행하고, 전문가 및 이해관계자 의견 수렴을 거친 후 개선안을 올 상반기 내로 마련하기로 하였다.³⁾

국무총리실 규제심판부는, 토양 중 불소 관리체계와 관련하여 환경부에게 ①토양광물 내부에 존재하는 불소(이하 ‘자연기원 불소’라 한다.)와 인간활동에 의해 발생하는 불소(이하 ‘인공기원 불소’라 한다.)의 통합관리에 따른 과도한 토양 정화비용의 발생, ②정화비용 증가에 따른 분양가 인상⁴⁾ 및 공사기간 지연 등으로 인한 국민 부담 증가, ③국내 토양의 성질 및 지반의 특성을 반영하지 못한 정화기준, ④토양 중 불소 오염토양의 정화를 둘러싼 산업계 내 이견과 갈등 등을 고려하여 관리체계의 합리적 개편을 권고하였다.⁵⁾

토양은 물 공급 및 수질 조절, 대기질 조절, 생물 서식지 및 식물 성장의 배지(培地) 역할을 하는 환경매체 중 하나로, 토양을 구성하는 광물에는 많은 무기성분들이 존재하는데 이 중 하나가 불소물질이다. 우리나라는 1995년 「토양환경보전법」(이하 ‘법’이라 한다.)을 제정하여 11종의 토양오염물질을, 2002년 불소를 토양오염물질로 지정하여 16종을, 2018년 다이옥신 지정 이후 2021년 이에 대한 기준을 지정하여 현재까지 관리해 오고 있다.

불소는 대부분의 국가가 기원에 따라 자연기원 불소와 인공기원 불소로 분리하여 관리하고 있으며, 특히 자연기원 불소를 자연계에 존재하는 물질로 간주하여 별도의 정화기준을 두어 관리하지 않고 있다. 자연기원 불소에 대한 토양기준을 가지고 있는 몇몇 나라조차도 특별한 경우를 제외하고는 이를 정화의 직접적 판단 근거로는 삼지 않으며, 지하수 등에 미칠 수 있는 위해성을 평가한 후 부지별로 관리하고 있다. 또한 해외에서는 최근 유해성이 큰 인공기원 불소

1) 대한민국 전자관보, 「환경부령제1134호(토양환경보전법 시행규칙 일부개정령)」, 2024.12.12.

2) 국무조정실 국무총리비서실 보도자료, 「규제심판부, “국민·기업에 부담되는 불소규제, 국제적 수준에 맞게 개선해야”」, 2023.9.25.

3) 환경부 보도설명자료, 「불소의 토양오염기준을 인체 및 환경에 위해가 없는 범위 내에서 합리적으로 조정할 예정」, 2023.10.17., 「불소의 토양 오염우려기준을 합리적으로 개선하겠음」, 2023.11.2.

4) 하나의 사례를 살펴보면 서울시 OO 주택 재건축 부지는 2021년 10월 토양에서 불소가 검출되어 착공이 10개월 가량 지연되었고, 이에 따라 정화 비용(추정치 약 580억 원)이 추후 분양가에 반영될 것으로 추정하고 있음

5) 국무조정실 국무총리비서실 보도자료, 「규제심판부, “국민·기업에 부담되는 불소규제, 국제적 수준에 맞게 개선해야”」, 2023.9.25.

를 토양뿐 아니라 지표수, 지하수, 대기 등에서도 관련법으로 환경기준을 정하고 이 환경기준을 점차적으로 강화해 나가고 있다.

이 글은 현행 토양 중 불소 관리현황 및 문제점을 살펴보고, 주요국의 토양 중 불소 관리현황을 검토하여 시사점을 도출한다. 마지막으로 이에 기반하여 합리적인 개선방안을 제안하고자 한다.

II. 토양 중 불소 개관

1. 토양 중 불소

가. 토양 중 불소의 기원 및 특성

불소는 원자번호 9번의 할로젠족원소로 전기음성도와 반응성이 크다. 불소가 불소화합물의 형태로 모암(母巖) 내부에 존재할 경우 그 기원에 따라 자연기원과 인공기원으로 나눌 수 있다. 자연기원 불소는 지각과 해양에서 각각 13번째, 12번째로 많이 존재하는 물질로 평균농도는 각각 650mg/kg, 1.2~1.5mg/L이다. 또한 인공기원 불소는 산업활동을 통해 배출되는 물질로 불화수소(HF), 염화플루오린화탄소(CFC), 과불화합물(PFAS)⁶⁾로 나눌 수 있다. 그러나 HF와 CFC는 주로 기체로 존재하기 때문에 토양에 영향을 줄 수 있는 인공기원 불소는 PFAS가 대표적이다. PFAS는 물, 기름, 열, 얼룩 등에 강한 내구성과 저항성을 가지는 특성 때문에 화장품, 계면활성제, 식품 포장재, 방수제, 프라이팬 코팅 등 일상용품 및 산업 소재로 광범위하게 사용되고 있다.

자연기원 불소(fluoride, F⁻)는 형석(CaF₂), 빙정석(Na₃AlF₆), 인회석 등으로 보통 우리나라 중부지방에서 흔히 존재하는 화강암류 암석대에서 주로 발견된다. 이와는 달리 인공기원 불소(fluorine, F)는 주로 반도체 공정이나 화학산업 등 산업공정에서 발생하는 독성이 강하고 반응성이 강한 황록색 기체로 토양에서는 토양 외부에 흡착된 형태로 존재한다. 다른 화학물질 고유번호(CAS No.)⁷⁾를 가지고 있음에서도 알 수 있듯 토양에 존재하는 자연기원 불소와 인공기원 불소는 다른 물질이다.

자연기원 불소는 자연상태에서 극히 적은 양만이 토양수에 용해되어 지하수로 용출될 수 있

6) 과불화합물(Per- & Polyfluoroalkyl substances)은 탄화수소의 기본 골격 중 수소가 불소로 치환된 형태의 물질로 현재 1만여 종의 제품이 존재함. 이 중 대표적으로 관리되는 과불화합물은 과불화옥탄산(PFOA), 과불화옥탄술폰산(PFOS) 및 과불화헥산술폰산(PFHxS)이 있음

7) 카스번호(CAS No.)란 Chemical Abstract Service Register Number로 화학구조나 조성이 확정된 화학물질에 부여되는 고유 번호로 카스 번호가 다르면 다른 화학물질을 의미함

는데, 이때 불소의 이동성은 pH, 점토 함량, 탄산칼슘(CaCO_3) 함량 등 토양 자체 특성이나 산성비 등 외부 변수에 따라 달라질 수 있다.⁸⁾ PFAS는 분해되지 않고 환경매체에 남아 있어 ‘영원한 화학물질(forever chemicals)’로 불리기도 하는데, 최근 전세계적으로 PFAS의 유해성 때문에 토양 뿐 아니라 다른 환경매체에서도 사용을 금지하는 등 규제가 강화되고 있다.

표 1 | 불소 발생기원별 특징

구분	CAS No.	물질명(국문)	화학적식	상태	발생원
자연기원 불소	16984-48-8	플루오라이드 (Fluoride)	F^-	이온	- 암석에 있는 1차광물의 풍화작용을 통해 토양 및 지하수로 방출됨 - 지하수의 불소 함량은 주로 암석-물 상호작용에 기인함
인공기원 불소	7782-41-4	플루오린 (Fluorine)	F	기체 (F_2)	- 유리, 알루미늄, 철강 등과 관련된 산업에서 AlF_3, NaAlF_6, CaF_2와 같은 불소미립자가 방출됨 - 불산 제조공장, 석탄연소, 화력발전, 석유정제, 벽돌 및 타일공장, 직물염색공장 등에서 불소가 방출됨

자료: Saxena, V.K. and S. Ahmed(2003) Inferring the chemical parameters for the dissolution of fluoride in groundwater., Singh, G., B. Kumari, G. Sinam, Kriti, N. Kumar, S. Mallick(2018) Fluoride distribution and contamination in the water, soil and plants continuum and its remedial technologies, and Indian perspective –a review., CEPA(1996) National ambient air quality objectives for hydrogen fluoride (HF), Science assessment document., Ayoonb, S. and A.K. Gupta(2006) Fluoride in drinking water: A review on the status and stress effects., Jha, S.K., V.K. Mishra, D.K. Sharma, and T. Damodaran(2011) Fluoride in the environment and its metabolism in humans. In: D.M. Whitacre(ed.)(2011) Reviews of environmental contamination and toxicology.

나. 토양 중 불소의 유해성(危害性)

불소처럼 유해성평가 대상 토양오염물질은 일반적으로 ①유해성 확인,⁹⁾ ②용량-반응평가,¹⁰⁾ ③노출경로별 평가, ④위해도결정의 단계를 거쳐 관리된다. 그러나 우리나라는 자연기원 불소와 유해성이 있는 PFAS를 함께 ‘불소’로 관리하기 때문에 비발암성인 자연기원 불소도 발암성이 확인된 PFAS¹¹⁾와 마찬가지로 유해성평가 절차를 거치도록 하고 있다.

자연기원 불소는 다른 토양오염물질과는 달리 존재를 둘러싸고 찬반 논란이 뜨거운 물질이다. 세계보건기구(WHO)는 구강건강을 위해 수돗물 불소화를 권장하고 있다. 우리나라도 수돗물불소화사업¹²⁾을 통해 수돗물의 불소농도를 적정수준(0.8mg/L)으로 유지하도록 하고 있으며¹³⁾ 치아 관련 전문가들 또한 불소가 최소 950ppm이 들어있는 치약¹⁴⁾을 권장하고 있다.¹⁵⁾

8) Edmunds, W.M. and Smedley, P.L., 2013, Fluoride in natural waters, Essentials of medical geology, pp.311–336.

9) 물질의 유해성 종류, 독성자료, 발암성 또는 비발암성, 물리·화학적 특성 및 환경중 거동, 인체분포 및 대사 등에 대한 사항을 평가하여 결정함

10) 오염물질이 인체에 노출되었을 때 유해한 영향이 발생할 확률을 추정하는 과정으로 발암성 및 비발암성 물질에 따라 구분됨

11) 식품안전정보원, 「국제암연구소, 과불화화합물 발암성 평가... PFOA를 '인체발암물질(1군)'로, PFOS를 '인체발암가능물질(2B군)'로 분류」, 2023.12.2.

12) 적정량의 불소를 우리가 마시는 수돗물에 넣어 치아우식증(충치)을 예방하는 사업(「구강보건법 시행규칙」 제4조)

13) 보건복지부 보도자료, 「수돗사업 시행지역 아동충치 예방효과 ‘탁월’ - 「수돗물 불소농도 조정사업」효과 조사 연구결과 -」, 2024.1.10.

14) 치약의 불소기준은 「의약품 품목허가·신고·심사규정」에 따라 1,500ppm임

15) 대한치과의사협회, 「불소함유치약의 사용에 대한 예방치과연구회의 지침」

국제암연구소(IARC)도 자연기원 불소를 발암물질이 아닌 인체 발암성 미분류 물질(Group 3)로 분류하여 관리하고 있다.¹⁶⁾ 다만 불소가 인체로 다량 유입될 경우 메스꺼움이나 구토를 유발할 수 있으며 만성적으로 노출될 경우에는 치아불소증(dental fluorosis)¹⁷⁾ 및 골격불소증(skeletal fluorosis)¹⁸⁾ 등을 일으킬 수 있다는 문제는 끊임없이 제기되고 있다.¹⁹⁾

2. 토양 중 불소 관리의 필요성

불소오염토양의 정화와 관련해서 국내 산업계에서는 이견과 갈등이 있는데, ‘주택·건설업계’는 자연기원 불소가 정화대상에 포함됨에 따라 공사지연에 따른 피해가 발생하고 있어 이에 대한 규제가 합리적으로 정비되기를 호소하고 있는 반면,²⁰⁾ ‘토양정화업계’는 불소는 유해하기 때문에 불소의 기원과 상관없이 관리되어야 하고, 정부가 불소기준을 완화하는 것은 국민안전에 위협할 수 있어 불가하다는 입장이다.²¹⁾

자연기원 불소를 처리하기 위한 정화비용 또한 과도하다는 의견이 많은데, 2018년 환경부가 위해성평가계획서 작성 및 사후관리에 관한 구체적 사항을 「토양오염물질 위해성평가 지침」(이하 ‘지침’이라 함)으로 정한 이후, 불소 정화 대상 수(2018년 ~2022년)는 꾸준히 증가하는 추세로 수도권에서만 2018년 대비 6배가 증가하였다. 동 기간동안 정화비용은 약 250배 늘어난 것으로 조사되었는데, 전국적으로는 정화비용이 이보다 클 것으로 추정된다.²²⁾

표 2 | 최근 수도권 불소 정화물량 및 정화비용

구분	대상수(개소)		정화물량(m ³)		정화비용(억 원)	
	불소오염	복합오염	불소오염	복합오염	불소오염	복합오염
2018년	3	3	957.90	1,212,644.90	2	2,182
2019년	6	6	25,630.70	494,578.20	46	890
2020년	6	16	74,589.04	180,684.45	134	325
2021년	11	11	66,853.44	91,976.84	120	166
2022년	18	24	276,906.33	883,295.05	498	1,590
합계	44	60	444,937.4	2,863,179.40	800	5,153

자료: 환경부 제출자료

이와 관련하여 자연기원 불소가 지하수에 미치는 위해성을 파악하여 정화기준을 합리적으로 관리하는 방안 마련과 발암성이 확인된 PFAS에 대한 별도의 관리체계 마련이 필요하다.

16) IARC. IARC monographs on the identification of carcinogenic hazards to humans, Agents classified by the IARC monographs, Volumes 1-134., 2023.

17) 치아가 갈색 또는 검정색으로 착색되는 현상으로 주로 어린이에게 발현됨

18) 뼈에 불소가 축적되어 관절의 뻣근함 또는 통증이 발생하며, 심할 경우 뼈의 구조가 변하고 인대가 석화되어 근육장애를 유발함

19) 수도물불소화반대 2001 전국대회 자료집, 「수도물불소화를 우려한다」(http://no-fluoride.net/all_about/PaulConnett_concern1.htm)

20) 연합뉴스, 「불소 검출로 김포시립도서관 공사 1년 중단…제도 개선 건의」, 2023.6.28., 이데일리, 「서울교육청 신청사 부지서 기준 넘는 불소…“이전 1년 연기”」, 2023.4.27., 한국경제, 「조합원당 4000만원 더 내라… 방배13구역 복병된 환경규제」, 2023.11.1.

21) 국토일보, 환경초대석(한국토양정화협회동조합), 2023.12.15.

22) 연합뉴스, 「토양 내 불소 정화 기준 완화…시행규칙 개정안 입법예고」, 2024.8.29.

Ⅲ. 국내 토양 중 불소 관리현황

1. 토양 중 불소 관리 체계

가. 토양 중 불소 관리 규정

우리나라는 토양오염물질의 사용량 증가와 금속광산, 폐기물매립지, 주유소 등 토양오염유발시설 등의 불법 운영으로 토양오염이 심화되고 있다는 지적에 따라 1995년 「토양환경보전법」을 제정하여 토양오염을 관리해 오고 있다.²³⁾

토양오염이란 “사업활동이나 그 밖의 사람의 활동에 의하여 토양이 오염되는 것으로 사람의 건강·재산이나 환경에 피해를 주는 상태”를 말하며, 이러한 토양오염의 원인이 되는 물질을 토양오염물질이라고 한다. 토양오염물질은 현재 불소를 포함한 23종²⁴⁾의 물질과 환경부 장관이 필요에 따라 고시한 물질이 있다. 법에 따라 우려기준을 설정하여 관리하고 있으며, 우려기준을 초과하여 사람의 건강 및 재산과 동물·식물의 생육에 지장을 줄 경우 정화책임자는 오염토양을 정화하여야 한다. 이렇듯 우리 법에서는 원칙적으로 우려기준을 곧 정화기준으로 하고 있다.

법에서는 오염된 토양을 정화하기 위해 토양오염도 측정, 토양환경 정보시스템의 구축·운영, 토양환경평가, 토양오염 관리대상시설 등에 대한 조사, 토양 오염검사 제도 등을 규정하고 있다.²⁵⁾ 토양 실태조사를 거쳐 우려기준을 초과하는 토양오염이 확인되면 정화책임자는 토양정밀조사를 실시하여 정화범위, 오염확산 가능성 등을 도출한 후 원칙적으로 토양을 정화하여야 한다. 즉, 위해성평가 없이 토양을 정화해야 한다. 다만, 법 시행령 제11조의2에서 정하는 특별한 사유의 경우²⁶⁾ 예외적으로 위해성평가를 거쳐 부지별 정화목표를 설정하고, 위해성 저감조치²⁷⁾ 등을 실시할 수 있도록 규정하고 있다. 또한 법 제15조의3제3항에 따라 오염토양이 공사중간에 발견되면 반출정화가 허용되지만 착공 이전 단계에서 발견될 경우에는 반출할 수 없고 해당 부지에서만 정화가 가능하도록 규정하고 있다.

23) 의안정보시스템, 토양환경보전법안(의안번호 140826, 정부발의), 1994.10.27.

24) 카드뮴 및 그 화합물, 구리 및 그 화합물, 비소 및 그 화합물, 수은 및 그 화합물, 납 및 그 화합물, 6가크롬화합물, 아연 및 그 화합물, 니켈 및 그 화합물, **불소화합물**, 유기인화합물, 폴리클로리네이티드비페닐, 시안화합물, 페놀류, 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌, 석유계총탄화수소, 트리클로로에틸렌, 테트라클로로에틸렌, 벤조(a)피렌, 1,2-디클로로에탄, 다이옥신(퓨란을 포함한다), 그 밖에 위 물질과 유사한 토양오염물질로서 토양오염의 방지를 위하여 특별히 관리할 필요가 있다고 인정되어 환경부장관이 고시하는 물질

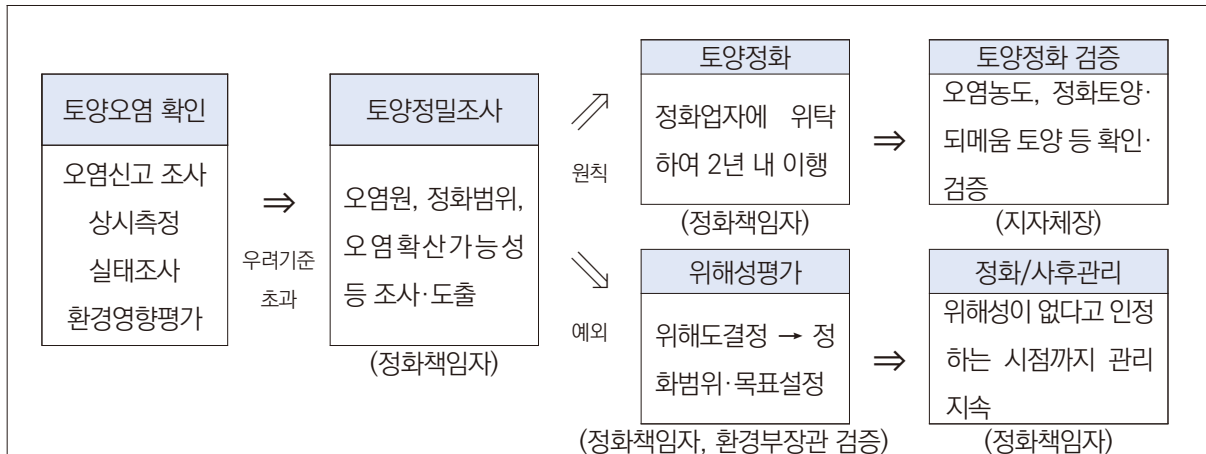
25) 김경민, 「토양환경 이력관리제도 도입을 위한 현황과 과제」, 『이슈와 논점』 국회입법조사처, 2016.10.7.

26) ① 국유재산에 토양오염이 발생하여 정화하는 경우, ② 정화책임자를 알 수 없거나 책임자에 의한 정화가 곤란한 경우, ③ 토양보전대책의 일환으로 오염토양 개선사업을 진행하는 경우, ④ 자연적인 원인(대상 부지의 기반암)으로 인한 토양오염임이 입증된 경우, ⑤ 국가·지자체·공공기관이 정화책임자(도로·철도 등)인 부지를 정화하는 경우

27) 오염구역 접근차단, 확산방지 대책(콘크리트 포장), 오염토양 상부 복토 등

위해성평가대상물질은 법 시행규칙 제19조의3 제1항 및 지침에서 정하고 있는 중금속류(카드뮴, 구리, 비소, 수은, 납, 6가크롬, 아연, 니켈), 유류(벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌, 석유계 총탄화수소(TPH), 기타(불소)²⁸⁾와 그 밖에 환경부장관이 인체와 환경에 위해를 줄 우려가 있다고 인정하여 고시한 물질이다.

| 그림 1 | 토양오염 정화절차



※ 자료: 「토양환경보전법」 재구성

우리나라는 토양오염물질 중 하나인 불소를 그 기원과 상관없이 ‘불소’로 통칭하여 관리하고 있다. 불소는 2002년 니켈, 아연, 트리클로로에틸렌(TCE), 테트라클로로에틸렌(PCE)과 함께 신규로 토양오염물질에 추가되었는데, 당시 정부는 불소를 추가하는 이유에 대해 “토양오염은 대기·수질오염 또는 폐기물에 의해 오염되는 2차오염의 경우가 대부분이므로 우선적으로 오염 물질에 추가하여 관리할 필요가 있기 때문에 선정한다”고 밝혔다.²⁹⁾ 불소에 대한 토양오염우려 기준³⁰⁾은 제정 당시 토지이용 용도에 따라 1지역, 2지역은 400mg/kg, 3지역은 800mg/kg³¹⁾으로 정해져 이를 초과하면 정화하여야 한다. 다른 나라에 비해 엄격한 불소에 대한 우려기준은 우리나라 지질특성을 반영하지 않아 지나치게 이상적이고, 과학적인 분석 없이 전문가 의견 조사 등만을 통해 가장 보수적인 값으로 결정되었다는 비판이 당시에 제기되기도 하였다. 이후 환경부는 2013년 토양 중 불소의 위해성에 대한 연구³²⁾를 통해, ① 외국의 토양정화기준, 독성 자료 및 기타 국내 검출 관련 자료 등을 토대로 기준설정 관련 설문지 작성, ② 80개 기관(학계, 연구소, 업계 등) 대상 설문조사 결과 최고 응답률을 보인 값을 후보값으로 선정, ③ 후보값 대상 위해성평가 실시를 거쳐 지침을 개정을 통해 2015년 불소에 대한 위해성기준을 제시하였다.³³⁾

28) 자연기원 불소와 인공기원 불소를 총칭하여 ‘불소’라 명명하고 있음

29) 국립환경과학원, 「새로운 토양오염물질 기준설정 및 시험방법에 관한 연구」, 2001.

30) 「토양환경보전법」 시행규칙 [별표3]에 따라 1지역은 주거지역, 2지역은 임야·하천, 3지역은 공장·군사시설 등임

31) 2024년 12월 12일 법이 개정되기 전까지는 1지역과 2지역은 400mg/kg, 3지역은 800mg/kg이었음

32) 국립환경과학원, 「토양오염기준 설정체계선진화 방안 연구」, 2013.

| 표 3 | 토양오염물질 우려기준

(단위: mg/kg)

지역구분	1지역	2지역	3지역
카드뮴(Cd)	4	10	60
구리(Cu)	150	500	2,000
비소(As)	25	50	200
수은(Hg)	4	10	20
납(Pb)	200	400	700
6가 크롬(Cr ⁶⁺)	5	15	40
아연(Zn)	300	600	2,000
니켈(Ni)	100	200	500
불소(F)	800(400)	1,300(400)	2,000(800)
유기인화합물	10	10	30
폴리크로리네이트디비페닐(PCBs)	1	4	12
시안(CN)	2	2	120
페놀(C ₆ H ₅ OH)	4	4	20
벤젠(C ₆ H ₆)	1	1	3
톨루엔(C ₆ H ₈)	20	20	60
에틸벤젠(C ₆ H ₅ C ₂ H ₅)	50	50	340
크실렌(C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂)	15	15	45
석유계총탄화수소(TPH)	500	800	2,000
트리클로로에틸렌(C ₂ HCl ₃)	8	8	40
테트라클로로에틸렌(C ₂ Cl ₄)	4	4	25
벤조(a)피렌	0.7	2	7
1,2-디클로로에탄	5	7	70

※ 주1: 1지역: 주거지역, 2지역: 임야·농지, 3지역: 공장 등 산업지역

주2: 불소의 경우 ()는 2024년 12월 12일 개정 전까지 수치임

※ 자료: 토양환경보전법 시행규칙 [별표3] 토양오염우려기준

우려기준을 초과한 불소오염토양에 대한 정화방법은 「특정토양오염관리대상시설의 토양오염방지시설 및 오염토양의 정화방법 등에 관한 고시」(이하 ‘고시’라 한다.) [별표 2]에 따라 생물학적처리, 물리·화학적처리, 열적처리 등이 있는데, 현재 공사 시작 전에 발견된 불소에 대한 처리방법은 물리·화학적 처리방법 중 하나인 토양세척법³⁴⁾에 따른다.

나. 불소에 대한 물환경에서의 관련 규정

자연기원 불소는 지하수로 용출되어 우리가 음용할 수 있음에도 「지하수법」에는 불소기준이 규정되어 있지 않다. 다만, 지하수를 취수하여 음용할 경우를 대비하여 「먹는물관리법」 제5조 및 「먹는물 수질기준 및 검사 등에 관한 규칙」 [별표 1]에서 규정하고 있는데, 지하수에서의 불소기준은 1.5mg/L이다. 「물환경보전법」 상 가장 깨끗한 상태로 수질을 보전해야 하는 청정지

33) 환경부 고시 제2015-64호에 따라 평가대상 토양오염물질 “(3) 기타”를 “(3) 기타: 불소”로 변경

34) 적절한 세척제를 사용하여 토양입자에 결합되어 있는 유해한 오염물질의 표면장력을 약화시키거나 중금속을 액상으로 변화시켜 토양입자로부터 분리시켜 처리하는 공법임

역에서의 불소 배출허용기준은 3mg/L이다.³⁵⁾ 또한, 「구강보건법 시행규칙」 상 수돗물에서의 불소기준은 먹는물수질기준보다 낮은 0.8mg/L이다(제4조). 처음으로 동법 시행규칙 [별표 2]에서 PFAS 3종³⁶⁾을 2020년부터 감시항목³⁷⁾으로 지정하고 있으나 수질기준은 마련되어 있지 않다. 다만, 지하수 수질기준과 먹는물 수질기준에는 PFAS에 대한 규제는 없는 상태이다.

2. 토양 중 불소 관련 현황

가. 토양 중 불소 현황

자연기원 불소는 암석에 흔히 존재하는 친석원소(親石元素) 중 하나로 불소가 함유된 암석광물이 오랜시간 풍화되어 토양 중 불소 배경농도³⁸⁾를 높인다.³⁹⁾ 우리나라 토양 불소 배경농도는 258mg/kg(15.3~504.8mg/kg)이고,⁴⁰⁾ 토양 중 불소 평균농도는 625mg/kg이다. 환경부는 전국 10개 권역 8,768 지점(17,536 시료)⁴¹⁾에서 토양오염실태조사를 실시하였는데 이 결과 1지역 중 불소 우려기준을 초과하는 지역 비율이 15.2%(1,337지점)로 나타났다. 비소를 제외한 다른 중금속오염물질의 초과 비율이 평균 1% 미만인 것과 비교하면 매우 높은 수준으로 이는 다른 물질들에 비해 기준농도가 우리나라 상황을 고려하지 못하고 엄격하게 정해져 있음을 의미한다.

표 4 | 자연기원 토양오염물질 배경농도 현황(1지역)

구분(mg/kg)	최소값	최대값	중앙값	평균값	초과지역 수	초과지역 비율
불소(400)	5	4,725	238	258	1,337	15.2
납(200)	2	5,828	20.9	25.7	50	0.6
구리(150)	0.5	1,966	14.4	18.5	23	0.3
비소(25)	0.75	568	6.04	8.51	374	4.3

자료: 환경부 제출자료

2020년 토양측정망 조사결과를 살펴보면, 토양 중 불소 평균값은 우려기준의 약 55%(약 200ppm) 수준으로 다른 물질들에 비해 가장 엄격하다.

35) 샘물, 먹는샘물, 염(鹽)지하수, 먹는염지하수에 대해서는 2.0mg/L임

36) 과불화옥탄산(PFOA), 과불화옥탄술폰산(PFOS), 과불화헥산술폰산(PFHxS)로 특징은 난분해성이며 자연계에는 존재하지 않음

37) 감시항목이란 「물환경보전법 시행규칙」[별표 2]에서 수질오염물질 항목으로는 정하고 있으나 동 시행규칙 [별표 13]에 따른 기준은 정해져 있지 않은 항목으로 추후 모니터링을 통해 기준을 마련하는 후보물질임

38) 인간환경에 영향을 받지 않는 자연적 현상(자연적 풍화 등)만을 반영한 불소농도(Reimann, C., and R.G. Garrett, 2005. Geochemical background – concept and reality. Science of the Total Environment, 350(1-3): 12-27.)

39) Totsche, K.U., J. Environ. Qual., 「Evaluation of fluoride-induced metal mobilization in soil columns」, 2000.

40) 국립환경과학원, J. Soil Groundwater Environ., 「토양 중 불소 분포 및 거동 특성 평가」, 2018.

41) 조사면적은 93,859km²으로 우리나라 전체 면적을 권역별로 나눠 조사를 실시함

| 표 5 | 1지역 토양측정망 조사결과(2020년 기준)

(단위: mg/kg)

구분		TPH	F	Cu	As	Hg	Pb	Cr ⁶⁺	Zn	Ni
2020 년	평균 (%)	61.097 (12.2)	219.812 (55.0)	20.924 (13.9)	5.445 (21.8)	0.031 (0.8)	18.895 (9.4)	0.155 (3.1)	91.650 (30.5)	3.956 (14.0)

자료: 환경부 토양측정망 결과 재구성

우리나라 중부지방 화강암대에서 흔히 분포하는 형석(fluorite or fluorspar), 형광인회석(fluorapatite), 빙정석(cryolite) 등 자연기원 불소는 평균 870mg/kg(20~2,700mg/kg)으로 높은 수준을 보이고 있으며 어떤 지역에서는 41,500mg/kg까지 존재한다.⁴²⁾

우리나라 정수장에서의 PFAS 현황(2012~2016년)을 살펴보면, PFOA⁴³⁾함량이 산업단지가 밀집되어 있는 낙동강 유역에서 평균농도 0.003 μ g/L으로 조사되었는데, 이는 한강, 금강, 영산·섬진강 유역보다 약 4배(0.014 μ g/L) 가량 높은 수치이다.⁴⁴⁾ 지하수나 지표수에서 취수한 물을 정수하는 정수장에서의 수질은 이와 연계된 토양과의 상호작용이 큼에도 PFAS는 자연기원 불소와 함께 불소화합물로 함께 관리되고 있어 그 유해성에도 불구하고 별도로 관리되지 못하고 있다.

나. 불소 유해성 현황

자연기원 불소의 유해성기준은 「환경보건법 시행규칙」 [별표 1]에 따라 위험지수⁴⁵⁾ 1을 기준으로 비발암위해도 유무를 판단하여 결정하고 있다. 환경부는 2013년 1지역의 우려기준(400mg/kg)을 적용하여 비발암위해도를 0.079~0.094⁴⁶⁾로 제시하였고, 추후 자연기원 불소의 독성값, 생물농축계수 등 추가 검토 및 국제적 동향을 고려하여 합리적으로 개선하고, 이를 통해 토양오염 우려기준을 재설정한다는 입장이었다.

2013년 환경부 연구 결과 발췌

(중략) 이 값을 이용하여 캐나다 앨버타주(州)에서 제공하는 경구 및 접촉 비발암참고치를 고려한 비발암위해도는 0.079~0.094로 평가되었다. 우리나라 유해성평가 지침에 따르면 ‘허용가능한 비발암위해도는 1이며, 산정된 비발암 위해도가 1보다 크면 비발암위해성이 있는 것으로 판단한다’라고 명시되어 있어 현행 불소의 토양오염기준은 보수적인 것으로 판단되나 불소의 독성값, 생물농축계수 등의 추가검토 및 국제적 동향 등을 고려하여 토양오염기준의 조정 추진이 필요하다고 사료된다. 이와 관련된 토양 섭취/접촉에 대한 (이하 생략)

42) SGIS 토양지하수정보시스템 각 연도별 자료

43) 미국 환경청 자료(EPA Document No. 815R24006)에 따르면 PFOA는 독성값 3 $\times 10^{-5}$ (mg/kg/d)로 유해하다고 판단하고 있음

44) 환경부 보도자료, 「환경부 수돗물 수질감시 강화 수질감시항목 4종 신규 지정, 총 32항목으로 확대」, 2018.5.30.

45) "위험지수"란 독성역치가 있는 환경유해인자에 대한 노출 수준을 동일 노출기간의 최대허용 노출량으로 나눈 값임

46) 이 범위 중 가지역(현재는 1지역에 해당)은 0.0851로 확정함

토양과 관련된 우리나라 불소위해성평가는 ‘인체와 환경에 미치는 영향’을 중심으로 동 지침 [별지 제5호 서식]에 의해 노출경로별로 위해성을 계산하고 있는데, 노출경로는 ① 토양섭취, ② 농작물섭취, ③ 지하수섭취, ④ 토양접촉, ⑤ 실외비산먼지흡입 항목으로 나눌 수 있다.

[환경부고시 제2018-184호] 토양오염물질 위해성평가 지침

[별지 제5호 서식] 정화목표치 계산방법 적용

■ 노출경로별 토양 정화목표치(C_s) 계산

예시) 토양 섭취경로

$$C_s = \frac{THQ \times RfD_o \times BW \times AT}{CR_s \times RBA \times CF_1 \times EF \times ED}$$

THQ(위험지수), RfD_o (경구비발암참고치, mg/kg-day)

RBA(상대적생물학적유효도)

BW(체중, kg), AT(평균시간, days), CR_s (토양섭취량, mg/day)

EF(노출빈도, days/year), ED(노출기간, years)

CF_1 (단위환산인자, 1.0E-06, mg/kg)

■ 1지역 우려기준 산정

1								
1	1	1	1	1				
토양 섭취	+	농작물 섭취	+	지하수 섭취	+	토양 접촉	+	실외 비산먼지 흡입

자연기원 불소에 대한 위해성평가 결과, 동 지침 [별지 제3호 서식]에서 토양섭취 항목은 놀이터 등에서 어린이가 하루 118mg을 섭취하는 것을 기준으로, 농작물⁴⁷⁾섭취 항목은 토양-식물간 생물축적계수(BCF)⁴⁸⁾를 고려하고 있다. 지하수토양환경학회⁴⁹⁾에 따르면, 토양 중 불소는 칼슘과 쉽게 결합하는 특성이 있어 자연계에서는 불소가 농작물로 전이되어 축적되기 어려운 것으로 판단하고 있다.⁵⁰⁾ 토양접촉 및 실외 비산먼지 흡입 항목을 살펴보면, 토양은 환경오염의 최종수용체(受容體)로 대기, 물, 생물 등 타 환경매체(媒體)와 복잡하고 긴밀한 상호작용을 하고 있으나 정작 토양광물 자체는 다른 매체로의 이동은 적은 편이다. 예를 들어 대기 중 질소와 탄소 등은 토양으로 이동하고, 토양수분⁵¹⁾과 토양은 침출되어 강물로 이동하기도 하지만, 침식되고 퇴적된 토양 중 자연기원 물질이 외부로 유출되기는 어렵다.

| 표 6 | 자연기원불소 토양오염우려기준 설정을 위한 위해성평가

물질명 (CAS No.)	발암등급	섭취경로	접촉경로	흡입경로
		경구비발암참고치* (mg/kg-day)	피부독성참고치** (mg/kg-day)	흡입노출참고농도* (mg/m ³)
불소(Fluoride) (16984-48-8)	3(IARC) →비발암물질	0.04	0.04	0.013

주: * CalEPA 독성자료 기반(USEPA RSL Table November 2023), ** $RfDabs = RfDo \times ABSGI$

자료: 환경부 제출자료

47) 지침에 따라 곡류(0.006), 과일류(0.006), 엽채류(0.060), 근채류(0.006)으로 정하고 있음

48) 토양 중 오염물질이 식물로 이동되는 정도를 평가하는 인자로 토양 중 오염물질의 함량 대비 식물 중 오염물질 함량의 비율로 정의됨

49) 지하수토양환경학회, 「과학적·합리적 불소 토양오염기준안 마련을 위한 토론회」, 2024.5.30.

50) 「식품의 기준 및 규격」 및 「CODEX 가이드라인」

51) 토양입자나 공극사이에 양적으로 내포되어 중력에 역행하여 스며들어 있는 물을 말함

지하수섭취 항목과 관련해서 우리나라는 지침을 제정할 당시 미국환경청의 노출평가 방식을 채택하였는데 미국은 지하수의 불소농도를 직접 측정하거나 희석저감계수(DAF)⁵²⁾를 ‘1~20’ 사이에서 선택하여 노출을 평가한다.⁵³⁾ 일례로 미국 연방은 DAF 1⁵⁴⁾을, 플로리다주는 20을 적용한다. 이에 따라 미국 연방은 주거지역에서의 자연기원 불소기준을 3,100mg/kg으로 정하고 있다. 이를 통해 우리나라는 400mg/kg으로 토양오염우려기준을 정한바 있다.

표 7 | 미국 연방, 플로리다주의 경로별 참고치를 통해 도출된 우리나라 토양오염우려기준

미국연방			플로리다주			우리나라	
토양별기준		지하수보호도양기준	토양정화목표기준		지하수정화목표기준		
(mg/kg)		(mg/kg)	(mg/kg)		(μg/L)	(mg/kg)	
주거지역	산업지역	DAF =1	주거지역	산업지역	지하수기준	토양오염우려기준(1지역)	배경농도
3,100	47,000	120	840*	13,000	2,000	400	258

자료: 환경부 제출자료

다. 토양 중 불소 시험방법

우리나라는 자연기원 불소와 PFAS를 함께 ‘불소’로 측정하고 있다. 불소 분석을 위해서는 우선 토양을 막자사발로 분쇄하여 시료(試料)를 만드는 전처리(前處理) 과정⁵⁵⁾을 거친 시료 내 불소를 액체에 녹여 이 액체를 기기로 분석하는 과정으로 나누어진다. 기기분석 과정은 강산(強酸)으로 가열하여 토양에 존재하는 불소 전함량을 측정하는 함량법⁵⁶⁾이 있다. 그러나 농업계는 연구조사에 한하여 「농업과학기술 연구조사분석기준」을 마련하여 환경부가 정하고 있는 함량법과는 별도로 식물흡수량을 측정하기 위해 용출법을 사용할 수도 있다. 이렇듯 기기분석 방식은 함량법과 용출법으로 이원화되어 있는 그 이유는 함량법으로는 토양에 존재하는 모든 형태의 불소를 측정하기 위함이고, 용출법으로는 자연계에서 발생할 수 있는 불소 거동(舉動)을 측정하기 위함이다.

현재 우리나라는 토양 중 PFAS 분석방법은 마련되어 있지 않고, 수질의 경우에만 「국립환경과학원 고시」에 따라 PFOA, PFOS, PFHxS⁵⁷⁾을 분석할 수 있다.

52) 토양 3상분배(고상·액상·기상)에 따라 토양에서 유래된 오염물질 유출수가 지하수와 혼합되어 희석되는 현상을 반영하는 인자로 토양오염 위해성평가(지하수 섭취경로)시, 토양 농도 유래 지하수 농도 산정시 적용됨

53) 미국을 제외한 나라에서는 DAF를 사용하지 않고 있음

54) ‘DAF 1’이란 의미는 토양오염물질이 유출되어 지하수로 이동 시 희석되지 않는다는 의미로, 정보가 제한적인 부지 평가 초기단계에 참고값으로 사용되도록 설계 적용되는 계수임

55) 「토양오염공정시험기준」(ES 07130.c)에 따라 조사지점의 표토(表土, 0~15cm)를 채취한 후 막자사발로 분쇄함

56) 우리나라는 2009년 10월 29일 8종 금속류에 대한 전처리 분석방법을 용출법에서 함량법으로 「토양오염공정시험기준」(환경부 고시 제 2009-255호)을 변경함

57) 잔류성유기오염물질(POPs) 측정 지정기관에서만 분석이 가능함

라. 토양오염우려기준 변경 현황

환경부는 법 시행규칙을 개정하여 불소에 대한 현행 토양우려기준을 1지역 400mg/kg, 2지역 400mg/kg, 3지역 800mg/kg에서 각각 800mg/kg, 1,300mg/kg, 2,000mg/kg으로 완화하였다.

그림 2 | 지역별 불소 토양오염우려기준

(단위: mg/kg)

	개정 전	⇒	개정 후
1지역	400		800
2지역	400		1,300
3지역	800		2,000

※ 자료: 환경부 보도자료 재구성

IV. 해외 주요국의 토양 중 불소 관리현황

거주지에 준하는 토양에 대해 자연기원 불소에 대한 기준을 설정하고 있는 국가는 5개(미국, 캐나다, 독일, 일본, 덴마크)⁵⁸⁾로 이 중 우리나라처럼 토양에 대한 기준(이하 ‘조치기준’이라 한다.)을 세우고 이 기준을 초과하면 정화하도록 하는 국가는 일본이 유일한 것으로 조사되었다.⁵⁹⁾ 일본을 제외한 4개국은 자연기원 불소에 대해서는 조사하거나 판단할 수 있는 조치기준만을 제시하고 있으며 조치기준을 초과하여도 정화하지는 않는 것으로 조사되었다. 다만, 이 조치기준을 정하는 이유는 지하수에 미치는 영향에 대한 정밀조사 및 복원 등의 판단기준으로 활용하기 위함이다.

표 8 | 국내외 자연기원 불소기준(2024년 기준)

구분	불소기준		조치기준	조치방법	시험방법
미국 ^{주1}	주거지	3,100	추가조사 여부 판단기준 조사 초기 참고값으로 활용	농도저감 및 위해저감조치	함량/용출
	산업지역 지하수 보호 토양기준	47,000 0.8mg/L (120mg/kg)			
캐나다 ^{주2}	농경지	200	추가조사 여부 판단기준	농도저감 및 위해저감조치	함량
	주거지/공원	400			
	상·공업지역	2,000			
덴마크	민감한 토지용도 (가정용 정원, 유치원, 운동장)	20	민감한 토지용도 사용기준	어린이용도토지 등 토지이용 제한	용출

58) 네덜란드는 2000년에 체코는 2016년에 자연기원불소 기준이 삭제됨

59) 환경부, 「국내외 사례 심층 분석을 통한 불소 토양 기준 적정성 평가 연구-최종보고」, 2023.2.15.,

독일 ^{주3}	모든 부지	용출 1.5mg/L	조사기준	예비조사, 정밀조사 ^{주5}	용출
일본 ^{주4}	모든 부지 (농경지 제외)	4,000 (용출 0.8mg/L)	토양함유량기준 =정화기준	농도저감·환토·성토 및 포장·출입금지	함량/용출
대한민국	농경·주거·임야 공장·주차장·도로	400 800	토양오염우려기준 =정화기준	농도저감(정화), 제한적 위해성평가	함량

주1: <https://www.epa.gov/risk/regional-screening-levels-rsls-generic-tables>, EPA Method 5050 Bomb preparation method for solidwaste

주2: <https://ccme.ca/en/summury-table>, Method of Soil Analysis Part 3. Chemical methods. 1996. Sparks, Editor. 850-852

주3: Federal Soil Protection and Contaminated Sites Ordinance (BBodSchV), BBodSchV 부록1 불화물(F-) 이온전극, 이온-크로마토그래피: DIN 38405-4 07.85 water, waste water and sludge; anions (group D); determination of fluoride (D4)

주4: 「오염토양처리업무가이드라인」(汚染土壌の処理業に関するガイドライン), JIS K0102:2019 Testing methods for industrial wastewater (Amendment 1)

주5: 조사결과 평가 후 정화, 보호, 제한조치 필요 정도를 결정

PFAS에 대한 규제와 관련해서는 선진국을 중심으로 우선 먹는물에 대한 기준을 마련 중에 있으며 토양에 대한 기준도 강화해 나가고 있다.⁶⁰⁾

1. 조치기준과 정화기준이 다른 국가의 토양 중 불소관리

미국의 토양오염 관리는 「포괄적 환경처리·보상·책임법(CERCLA)」⁶¹⁾을 근거로 불소로 오염된 토양은 폐기물에 준하여 처리하도록 하고 있다.⁶²⁾ 그러나 여기에서 말하는 불소로 오염된 토양이란 PFAS로 오염된 토양에 해당하며 주거지(우리나라 1지역)에서의 자연기원 불소기준은 추가조사 여부를 판단하기 위한 기준(조치기준)으로만 사용하고 있다.

미국은 2024년 4월 PFOA와 PFOS를 CERCLA에 유해물질로 지정하였고, PFOA는 연방차원에서 지역 선별 수준(RSLs)⁶³⁾을 1.3mg/kg으로 권고하고 있다.⁶⁴⁾ 뉴저지주의 사례를 살펴보면, PFAS의 지하수 유출량을 평가하도록 하고 있으며 이때 토양은 지역 특이성을 반영하도록 하고 있다.⁶⁵⁾

토양에 대한 규제수준도 주마다 차이가 발생하는데 미국 아이오와주는 주거지역에서의 PFOS를 0.00048mg/kg으로 강하게 규제하고 있으나, 펜실베이니아주는 4.4mg/kg⁶⁶⁾로 규제하고 있어 두 주는 약 9,167배 차이가 난다.⁶⁷⁾ 구체적으로 살펴보면 대체적으로 붉게 표시되는

60) ALS Global, 「New PFAS regulations are coming: what you need to know」, 2024.4.22.

61) CERCLA: Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability Act 로 일명 슈퍼펀드(Superfund)법이라고 함

62) 김경민, 「환경오염피해 구제에 관한 법률안의 주요내용과 개선과제」, 국회입법조사처 이슈와 논점, 2013.7.24.

63) <https://www.epa.gov/risk/regional-screening-levels-rsls-generic-tables>

64) PFOA: 주거용지(0.13mg/kg), 산업용지(1.6mg/kg), PFOS: 주거용지(0.19mg/kg), 산업용지(2.5mg/kg)

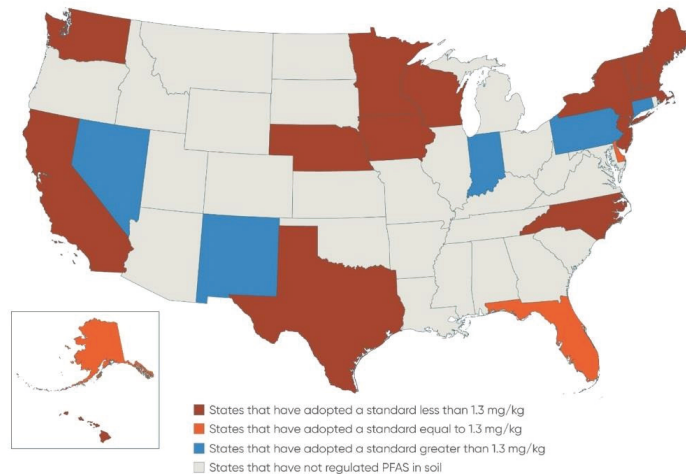
65) https://dep.nj.gov/wp-content/uploads/srp/rs_by_chemical_fraction.pdf, 4종의 PFAS(총 142종 토양오염물질)를 규제하고 있음

66) 비주거지역에서는 64mg/kg임

67) BCLP emerging.com, 「PFAS IN SOIL: STATE REGULATIONS」, 2023.12.4.

지역인 미국 동·서부와 농업이 발달한 중부는 연방정부가 권고하고 있는 1.3mg/kg(PFOA) 이하의 기준을 대체적으로 채택하고 있는 것으로 조사된다(그림 3).

그림 3 | 미국 연방의 PFOA기준을 채택한 주 현황



자료: <https://www.bclplaw.com/en-US>

이와는 별도로 미국은 2021년 10월 ‘PFAS 전략 로드맵(2021~2024)’⁶⁸⁾을 발표하여 토양을 포함한 모든 매체에서의 PFAS 규제를 전세계에서 가장 강하게 추진하고 있다.⁶⁹⁾ 또한 2024년 4월부터는 먹는 물에서 PFAS에 대한 새로운 식수기준도 발표하였다.⁷⁰⁾

표 9 | 미국 연방 먹는물 PFAS 기준(2024년 기준)

화학물질	목표농도(μg/L)	최대농도(μg/L)
헥사플루오로프로필렌 옥사이드 이량체 산(GenX)	10	10
과불화헥산술폰산(PFHxS)	10	10
퍼플루오르옥탄설포네이트(PFOS)	0	4
과불화옥탄산(PFOA)	0	4
퍼플루오로노나노산(PFNA)	10	10
PFAS 혼합	위험지수 1	

자료: <https://www.epa.gov/sdwa/and-polyfluoroalkyl-substances-pfas> 재구성

캐나다는 연방의 「토양환경기준지침(CEQGs)」⁷¹⁾과 각 주마다 특화된 기준을 가지고 이원화하여 관리하고 있다. 동 지침에 따라 토양오염의 조사를 위한 토양기준과 정화기준을 별도로 정하고 있다. 개별 주마다 토양위해성평가방법⁷²⁾에 따라 정화기준을 달리하고 있으며 법적인

68) https://www.epa.gov/system/files/documents/2021-10/pfas-roadmap_final-508.pdf

69) 2022년 9월 캘리포니아는 섬유·의류부문에서 PFAS 사용을 금지하는 법안을 통과시켜 2023년 1월부터 단계적으로 PFAS 화학물질이 포함된 제품군의 유통, 판매를 금지하거나 위험 표시를 하게 하는 등 엄격히 규제하고 있음

70) EPA, 「EPA is establishing the first-ever national drinking water standards to protect communities from exposure to PFAS」에서 PFOA와 PFOS는 4ppt로, PFHxS는 10ppt로 제한하고 있는데 이는 수질기술이 안정적으로 판독값을 얻을 수 있는 가장 낮은 수준으로 궁극적으로는 검출되지 않도록 한다는 방침임

71) CEQGs: Canadian Environmental Quality Guidelines

구속력 유무 또한 다르다. 브리티시컬럼비아주와 유콘 준주(準州)는 정화기준의 법적 구속력이 있으나, 기타 주에서는 법적 구속력이 없다. 캐나다와 우리나라를 비교해 보면, 주거지와 공원은 400mg/kg으로 우리나라와 같으며, 공장지역은 2,000mg/kg으로 우리나라보다 2.5배 높다.⁷³⁾ 캐나다는 별도의 지하수 불소규제는 없고⁷⁴⁾ 분석방법은 함량법을 사용하고 있다. PFAS에 대한 규제도 단계적으로 강화하는 추세인데 제조, 사용, 판매, 수입을 원칙적으로 금지하고, 2025년 1월 29일까지 관련 정보를 보고하도록 하고 있다.

독일은 「토양보호법(BBodSchG)」에 근거하여 토양을 관리하고 있는데 주로 지하수를 음용하기 때문에 지하수보호구역을 설정하고 있다. 동법에 따라 민감지역, 지하수보호구역, 평원지역에 대한 불소 기준은 각각 100, 500, 2,000mg/kg이다. 독일은 소관 관청과 정화의무자가 위해성평가에 근거하여 정화조치를 결정한다.⁷⁵⁾ 독일은 「연방 토양보호 및 오염된 부지 규칙(BBodSchV)」 [별표 3]에 따라 위해성평가를 어린이와 어른으로, 작물과 식물로 나누어 실시하고 있다. 자연기원 불소 분석방법(DIN 38405-4:1985-07)은 용출법이다.⁷⁶⁾

덴마크는 어린이가 주로 사용되는 민감한 토지를 관리하기 위한 기준(20mg/kg)을 두고 있는데 지하수를 보호하기 위한 방안으로 용출법을 사용한다. 덴마크는 PFAS에 대한 엄격한 기준을 가지고 있는데 2015년 12종의 총PFAS를 건조중량 기준 400 $\mu\text{g/kg}$ ⁷⁷⁾으로 정하였고, EU 최초로 PFAS 오염 제거를 위한 국가 행동계획을 발표하기도 하였다.⁷⁸⁾

EU 국가인 독일은 지하수 오염을 줄이기 위한 방안으로 토양 침출수에 대한 PFAS 기준치를 설정했으며, 일부 주에서는 토양 내 PFC 0.1mg/kg 제한을 적용하고 있다. 현재 EU의 PFAS 규제에 대한 입장은 PFAS 중 4종을 우선 규제한 후 단계적으로 그 규제를 전체 PFAS 물질로 확대한다는 방침이다.⁷⁹⁾⁸⁰⁾

2. 조치기준과 정화기준이 동일한 국가의 토양 중 불소관리

일본은 「토양오염대책법(土壤汚染対策法)」에서 토양오염상태가 토양함유량기준(우리나라의 우려기준)을 초과한 경우 건강상 위해가 발생할 우려가 있다고 판단되면 동법 제6조에 따라

72) RBCA, Risk-Based Corrective Action 모델을 통해 일반위해성평가(tier 1)와 부지 특이적 위해성평가(tier 2, 3)로 이루어지는데 tier 1은 토지이용도에 따른 위해성평가이며 tier 2는 정화수준 결정시 활용함

73) 산업 및 상업용지는 2,000mg/kg

74) <https://ccme.ca/en/summary-table>

75) 한국농촌경제연구원, 「독일 토양환경정책」, 해외농업·농정포커스, 2015.9.16.

76) https://www.gesetze-im-internet.de/bbodschr_2023/anlage_3.html

77) NIRAS, 「Can PFAS contamination spread to soil and groundwater by aerosols and foams generated in the sea water?」, 2022.11.22.

78) STATE OF GREEN, 「First in EU: Denmark launches plan to eliminate PFAS pollution」, 2024.6.3.

79) <https://eeb.org/wp-content/uploads/2023/10/PFAS-in-drinking-water-briefing-final-1.pdf>

80) <https://pfas-1.itrcweb.org>, <https://echa.europa.eu/hot-topics/perfluoroalkyl-chemicals-pfas>

‘요조치구역’으로 정한 후 오염된 토양을 제거하도록 하고 있다. 그러나 동법 제11조에 따라 **건강상 위해가 발생할 우려가 없다**고 판단될 때는 ‘형질변경시 신고필요구역’으로 정하고, 도도부현 지사에게 형질변경을 신고하도록 한 후 오염토양은 제거하지 않아도 된다.

일본은 동법 제1조에서 ‘토양오염으로 인한 인체건강상의 피해를 방지하기 위한 대책을 제정하여 국민의 건강을 보호하는 것을 목적으로 이 법을 제정한다’고 입법 목적을 밝히고 있다. 다만 이 때 법률상 ‘토양오염’은 「환경기본법」 제2조 제3항에 규정된 인간 활동에 의한 토양오염에 한정되며, **자연기원 오염물질인 경우에는 이 법의 적용을 받지 않고 지속적으로 정보만을 파악**하도록 하고 있다.⁸¹⁾ 동법에서는 불소의 토양함량기준을 4,000mg/kg과 토양용출기준 0.8mg/L 이하⁸²⁾로 정하고 있는데 이는 불소의 지하수 수질기준과 같은 수치이다.⁸³⁾

일본은 2021년(令和3年) 「토양오염대책법」을 개정하여 오염상황 파악⁸⁴⁾에 관한 조치 및 건강피해 예방조치 사항을 명확히 하였다.

오염상황 파악에 관한 조치

- 토양오염으로 인한 건강피해를 예방하기 위해서는 그 전제로서 건강피해를 일으킬 수 있는 토양오염의 상황을 정확하게 파악하는 것이 필요하다.
- 오염 가능성이 낮은 토지를 포함한 모든 토지를 조사하는 것은 법의 목적에 비추어 볼 때 합리적이지 않으므로, 토양오염 가능성이 높은 토지에 대해 조사할 필요성이 큰 일정한 계기를 포착하여 토양오염 조사를 실시함

건강피해 예방조치(오염이 파악된 지역 및 그 주변에서의 예방조치)

- 기준치 초과 시 오염정도와 건강피해 우려 여부에 따라 합리적이고 적절한 대책이 시행될 수 있도록 환경위험⁸⁵⁾에 따라 구역을 분류한다.
- 도도부현 지사는 필요 조치지역에서는 오염제거 등 계획의 작성을 지시한다.
- 오염된 토양이 존재하는 지역에서 형질 변화를 시행하는 경우, 환경적 위험성에 따른 시행방법에 따라 시행한다. (반출처에서의 예방조치)
- 반출되는 오염토양의 부적절한 처리로 인해 오염이 확산되지 않도록 오염토양의 반출을 규제하고 있다.

지하수에 미치는 영향을 알기 위한 토양용출량 측정방법은 동법 시행규칙 제6조제3항제4호⁸⁶⁾에서 토양함량 조사에 관한 측정방법은 동법 시행규칙 제6조제4항제2호에서 고시⁸⁷⁾하고

81) 법 집행의 각 측면에서, 별첨 1의 "토양 내의 특정 유해물질이 자연적 원인에 의한 것인지 여부를 판단하는 방법"을 참조하여 토양 내의 유해물질이 자연적 원인에 의한 것인지 여부를 판단하고, 법률의 적용 가능 여부를 판단할 필요가 있다. 또한 관할 지역의 자연적 원인에 의한 유해물질이 포함된 토양에 대한 정보를 파악하고 정리하도록 노력한다.(なお、法における「土壌汚染」とは、環境基本法(平成五年法律第九一号)第二条第三項に規定する、人の活動に伴って生ずる土壌の汚染に限定されるものであり、自然的原因により有害物質が含まれる土壌については、本法の対象とはならない。したがって、法の施行の各場面において、土壌中の有害物質が自然的原因によるものかどうかについて、別紙一の「土壌中の特定有害物質が自然的原因によるものかどうかの判定方法」を参考にして判断し、法の適用の可否を判断することとされた。また、貴管下の区域における、自然的原因により有害物質が含まれる土壌に関する情報の把握や整理等に努めることとされた。)

82) 「환경기본법(環境基本法)」 제4조에 따른 [별표 및 부표]에 따른 지하수불소기준

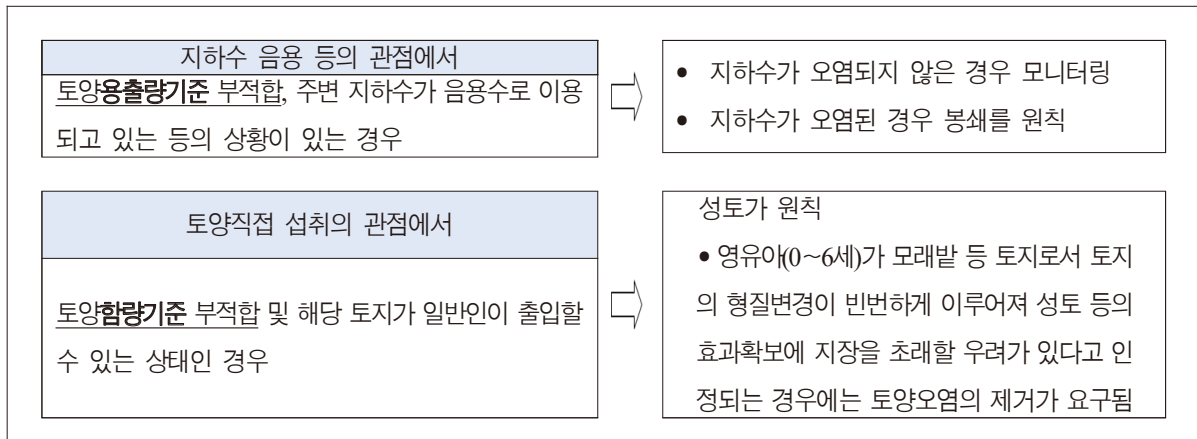
83) 일본 「토양오염대책법」에서 규정하고 있는 26개 물질 중 불소를 포함한 9개 항목은 지하수 용출을 고려한 토양용출기준과 토양함량기준을 동시에 가지고 있음

84) ①「토양오염대책법」 제3조에 따라 유해물질 사용으로 특정시설의 사용을 폐지한 경우, ②동법 제4조에 따라 일정 규모 이상의 토지의 형질을 도도부현지사의 명령으로 변경한 경우, ③동법 제5조에 따라 토양오염으로 도도부현 지사가 건강상 위해가 발생할 우려가 있다고 인정한 경우, ④동법 제14조에 따라 정보파악을 위한 조사에서 토양오염이 확인된 경우

85) 환경적 위험성이란 화학물질 고유의 유해성 정도와 인체노출 수준이 환경을 통해 사람에게 악영향을 미칠 수 있는 가능성을 고려함

있다. 이 「토양오염대책법에 따른 고시」에 따라 만약 10m 깊이까지 토양의 지질학적 연속성이 확인된다면 자연기원으로 간주하여 「환경기본법」 제16조제1항에 따른 환경기준 유지의 예외로 보고 있다.⁸⁸⁾

| 그림 4 | 일본의 토양 위해성관리



자료: 일본 환경성 발표자료, 「토양오염대책법 개요, 시행현황 및 토양 환경행정의 최신동향」, 2022.10.25. 재구성

동법에서 말하고 있는 위해성관리⁸⁹⁾는 ①유해물질이 함유된 토양을 직접 섭취하는 것과 ②토양 속의 유해물질을 지하수로 섭취하는 것으로 한정하고 있어 우리나라와 달리 공기나 식물로부터 섭취되는 경로는 고려하지 않고 있다(동법 시행령 제1조).⁹⁰⁾ 일본은 토양위해성평가 모델(GERAS)⁹¹⁾에 따라 노출량을 평가하는데 6세 이하 어린이(15kg)가 하루에 섭취할 것으로 예상되는 토양의 양을 200mg으로 하고, 섭취토양이 위산에 의해 용출된 후 100% 체내 흡수되는 것으로 가정하여 용출기준은 0.8mg/L, 정화기준은 지역과 상관없이 4,000mg/kg으로 제시하고 있다. 다른 해외에 비해 상대적으로 PFAS 규제가 늦은 일본은 2009년 PFOS를 「화학물질관리법」에 따라 제1종 특정화학물질로 지정하였고,⁹²⁾ PFAS의 생산 및 사용을 2025년 1월 10일부터 금지한다는 입장이다.⁹³⁾

86) 환경성고시 제46호(2020년 4월 2일 개정)

87) 환경성고시 제35호(2020년 3월 30일 개정)

88) <https://www.env.go.jp/kijun/dojou.html>, <https://www.env.go.jp/content/900540064.pdf>, 다만 이 경우에 해당하는 오염물질은 제2종특정유해물질(시안을 제외한 8종물질)임

89) 위해성평가와 위해성관리로 구성되는데 ‘위해성평가(risk assessment)’는 위해성의 크기를 승인된 과학적 방법에 따라 확률적으로 측정하는 것이며, ‘위해성관리(risk management)’는 위해성평가, 비용-편익 분석, 소비자 관심, 이해관계자의 의견 등을 통하여 획득한 정보를 비교·형량하는 정치적 과정임

90) 일본 환경성 발표자료, 「토양오염대책법 개요, 시행현황 및 토양 환경행정의 최신동향」에 따르면 피부 접촉, 대기 흡입, 생물농축, 농작물 섭취에 대한 고려는 하지 않는 것으로 조사됨

91) Geo-environmental Risk Assessment System

92) <https://www.env.go.jp/water/dojo/pfas.html>(土壤中のPFOS, PFOA及びPFHxSに係る暫定測定方法溶出量試験)

93) 국제환경규제 사전대응 지원시스템(COMPASS), 「일본, 138종의 PFOA 관련 화합물 금지 제안」, 2024.9.23.

V. 토양 중 불소의 합리적 개선방안

환경부는 2024년 12월 12일 법 시행규칙을 개정하여 인체와 환경에 위해가 없는 범위에서 1지역 토양오염 우려기준을 400mg/kg에서 800mg/kg으로 완화하였다. 이 완화된 기준은 시행일 이후 개발하고자 하는 토양부터 적용된다. 이 장에서는 우리나라에서의 토양 중 불소물질에 대한 합리적인 관리를 위한 개선방안을 제시한다.

1. 불소의 기원에 따른 분리 관리

가. 필요성

우리나라는 「환경정책기본법」에서 환경오염의 정의를 사업활동 및 인간활동으로 인한 즉, 인공기원 환경오염으로 한정하고 있다. 또한 이로 인해 발생할 수 있는 위해를 예방하고 질(質)적 수준을 관리하기 위한 방안으로 각종 환경기준⁹⁴⁾을 마련하도록 하고 있다. 「환경정책기본법」 제6조의2에서는 환경정책에 관한 다른 법령 등을 제정하거나 개정하는 경우에도 이 법을 따르도록 하고 있다. 「토양환경보전법」 제2조제1호에서는 토양오염을 인간활동에 따라 토양이 오염된 것으로 정의하고 있으나, 정작 동 조제2호에서 정하고 있는 ‘토양오염물질’에는 토양에 존재하는 불소 전체가 기원과 상관없이 포섭되고 있어 자연기원 불소도 일정 기준을 초과하면 정화하도록 하고 있다. 인간활동뿐만 아니라 자연계도 정화의 대상으로 하고 있는 것이다. 그러나 규제의 필요성이 큰 PFAS에 대한 규제는 아직 초기단계에 머물러 있는데, 특정지역에서 PFAS가 검출되었음에도 기준의 부재로 관리가 제대로 이루어지지 못하고 있다.⁹⁵⁾

나. 개선방안

법에서 정하고 있는 토양오염물질 중 ‘불소화합물’을 자연기원 불소와 인공기원 불소로 분리하여 법에서 관리할 필요가 있다.

첫째, 법 제2조제2호 및 동법 시행규칙 [별표 1]에서 제시하고 있는 ‘토양오염물질’의 종류에 자연기원 불소는 ‘불소화합물’로 인공기원 불소는 ‘과불화옥탄산(PFOA)’, ‘과불화옥탄술폰산(PFOS)’, ‘과불화헥산술폰산(PFHxS)’을 추가할 필요가 있다. 다만, [별표 3]에서 정하고 있는

94) 국민의 건강을 보호하고 쾌적한 환경을 조성하기 위하여 국가가 달성하고 유지하는 것이 바람직한 환경상의 조건 또는 질적인 수준으로 동법 시행령 [별표 1]에 따라 대기, 소음, 수질 및 수생태계, 지하수, 해역에 마련되어 있음

95) 연합뉴스, 「낙동강 원수·정수서 발암물질 과불화화합물 미량 검출」, 2020.7.7., 글로벌환경신문, 「부산 수돗물 이대로 절대 안돼! 또 물금취수장 발암물질 과불화화합물 등 검출」, 2022.4.12.

토양오염우려기준은 「물환경보전법」에서 감시항목으로 정하는 것을 참조하여 토양에서도 추후 토양오염정밀조사를 거친 후 별도로 정할 필요가 있다.

개정전	개정후
1. 카드뮴 및 그 화합물 9. 불소화합물 10 ~ 23. (생략)	1. 카드뮴 및 그 화합물 9. 불소화합물 10 ~ 23. (생략) 24. 과불화옥탄산(PFOA) 25. 과불화옥탄술폰산(PFOS) 26. 과불화헥산술폰산(PFHxS)

둘째, 장기적으로는 미국, 독일 등과 같이 자연기원 불소가 존재하는 토양을 오염토양이 아니라 자연계에 존재하는 환경물질 중 하나로 보고 모니터링에 사용하고, 특별한 경우에 한정하여 정화조치가 이루어지도록 하는 방안을 고려해 볼 수 있다. PFAS는 인간활동이 일어나는 지역에서만 배출되는 특성을 가진 물질로, 지역상황을 반영하여 지자체단체장이 모니터링하고 관리가 필요하다고 판단될 경우에는 정밀조사를 거쳐 정화할 수 있도록 할 필요가 있다. 이 경우 지역특이성이 반영되는 정화조치는 조례로 정할 수 있도록 하는 방안도 고려해 볼 수 있다.

셋째, [그림 1]을 참조하여 자연기원 불소는 토양오염이 확인되면 정밀조사를 거쳐 위해성을 평가하도록 하고, PFAS의 경우에는 개발 전에 토양오염이 확인면 반출하여 정화할 수 있도록 하는 근거를 마련하도록 할 필요가 있다.

2. 정화기준과 구별되는 토양환경기준(안)의 마련

가. 필요성

우리나라처럼 좁은 국토에서 집약적인 산업발전을 이룬 나라에서는 토양오염의 가능성이 주요국에 비해 상당히 높고 토양이 오염될 가능성이 높기 때문에 이를 재사용할 필요가 높아 오염된 토양에 대한 정화기준은 상당히 보수적으로 정해질 수밖에 없다. 또한 인간에 의해 개발이 사실상 어려운 산지의 경우에는 자연기원 물질에 의한 영향이 대부분이다. 그러나 우리나라 토양에 존재하는 자연기원 불소물질은 모암으로부터 기원하여 위해성이 현저히 낮음에도 단지 보수적으로 정해진 우려기준 이상 존재한다는 이유만으로도 지질학적으로 연속성을 가진 심토(深土)까지 토양오염 상태로 간주하여 정화하도록 하고 있다.

일본을 제외한 자연기원 불소기준을 가진 국가들은 자연기원 불소기준에 대해서는 추후 추가조사 여부를 판단하는 근거로만 사용하고 있으며 이를 정화의 판단근거로 사용하지 않고 있다. 토양오염은 다분히 지역 특이성을 가진 환경매체이다. 일본의 사례를 참조하여 토양에 대

한 위해성평가를 거쳐 위해가 발생할 우려가 없다고 판단될 때는 ‘형질변경시 신고필요구역’으로 정하여 지자체단체장이 정화하지 않도록 하는 방안의 마련이 필요해 보인다.

나. 개선방안

「토양환경보전법」 제2조에 ‘토양환경기준’을 규정하여 토양환경기준에 대한 정보를 구축하고, 이 정보를 통해 토양오염물질을 정화해야 하는 토양을 정하도록 하며 만약 위해성평가를 거쳐야 하는 물질인 경우에는 ‘정화기준’을 정하여 이를 초과할 경우 정화할 수 있도록 할 필요가 있다. 현재 법 제5조에서 토양오염도 측정망을 운영 중에 있고, 법 시행규칙 제4조제4호에서 ‘자연적 원인에 의한 토양오염물질이 검출되는 지역’을 정밀조사지역으로 정하고 있기 때문에 정화기준과는 별도의 토양환경기준 마련이 가능할 것으로 판단된다. 토양환경기준을 마련하기 위해서는 다음과 같은 조치가 필요하다.

첫째, 토양환경기준을 법으로 정하기 위해서는 우선적으로 법에서 ‘토양환경’의 정의가 마련될 필요가 있다. 현재 우리나라는 ‘토양오염’에 대한 정의는 있으나 정작 ‘토양환경’에 대한 정의가 없기 때문에, 법으로는 오염된 토양만을 관리하도록 하고 있음에도, 인간활동에 의해 오염되지 않은 토양도 사전예방적 관리 차원에서 오염된 토양과 동일하게 관리되고 있다. 법 제2조에 ‘토양환경’의 정의를 마련하여 자연기원 불소가 존재하는 토양이 오염토양을 관리하는 규제에서 벗어날 수 있는 방안을 마련할 필요가 있다.

둘째, 「환경정책기본법 시행령」 제2조[별표 1]에 환경기준 중 하나로 ‘토양환경기준’을 마련하고, 「토양환경보전법」 제2조의 정의 조항에 각각 ①토양환경기준, ②토양오염우려기준, ③정화기준을 명시할 필요가 있다. 이를 통해 국민들이 우리 토양환경기준과 정화의 기준을 명확히 인지할 수 있을 것으로 보인다.

셋째, 법 제4조의3제6호에서 환경부령으로 정하는 정보에 ‘토양환경기준의 정보’를 담을 수 있도록 하여 불필요한 토양정화비용을 줄일 수 있도록 할 필요가 있다.

3. 토양 위해성평가 개선

가. 필요성

오염된 토양에서 용출된 오염물질은 지하수를 광범위하게 오염시킬 수 있으며 지하수는 한번 오염되면 완전하게 복원되기 어렵다. 우리나라의 경우 토양은 「토양환경보전법」으로, 지하수는 「지하수법」으로 각각 오염물질을 관리하고 있다. 불소와 관련하여 「토양환경보전법」에서

는 불소오염기준을 정하고 있으나, 정작 「지하수법」에는 불소기준이 없다. 즉 자연기원 불소가 지하수로 확산되더라도 지하수에서 규정하는 오염물질이 아니면 추가 조사 및 정화 관리를 시행할 수 있는 법적 근거가 부족하다. 그 원인을 살펴보면, 우리나라는 주로 지표수를 취수하여 정수한 후 음용하고 있어 지하수는 보조 식수원이거나 저급(低級)용수라고 인식하고 있기 때문으로 보인다. 이는 농촌 등에서 지하수를 취수하여 음용할 경우를 대비하여 「먹는물관리법」에 서만 불소기준을 1.5mg/L로 규정하고 있는 것을 통해서도 추론할 수 있다.

토양정밀조사를 위한 중요 측정망 자료 구축과 관련해서도 토양 지하수정보시스템⁹⁶⁾에서 공개하도록 하고 있는 ‘토양측정망 정보’와 ‘지하수 수질측정망 정보’가 공개되어 있지 않다. 또한 「토양정밀조사의 세부방법에 관한 규정」에는 ‘토양으로부터 확산이 우려될 경우 토양 외 지하수, 지표수, 퇴적토 등을 조사’하고 있으나, 여기에는 확산 우려에 대한 판단 기준, 구체적인 조사방법, 조사 결과의 평가 방법, 매체별 기준 초과 시 후속 절차 등에 관한 내용이 포함되어 있지 않다. 나아가 토양오염의 지하수 및 지표수로의 배출·확산을 대비하기 위한 조사 및 오염 제거, 정화 등의 실시 근거 역시 매체별로 개별법에서 명확한 규정을 두고 있지 않다.

한편, 토양 퇴적물의 오염평가 기준에도 불소물질은 없다. 즉 현재 퇴적토는 「물환경보전법」에의 ‘하천·호소 퇴적물 오염평가기준’에 따라 단순히 수질측정망을 통해 오염현황을 파악하는 수준에 그치고 있다. 그러나 토양 퇴적물의 오염평가 기준에 불소물질은 없는 것을 확인할 수 있다. 결국 토양오염물질 관리는 환경매체 전반에 걸쳐 통합적으로 관리될 필요가 있다.

토양 중 오염물질 농도 분석방법과 관련해서는 분석 시 매체별 특성을 반영할 필요가 있다. 자연계에서 타 환경매체로 이동하여 인간의 건강에 영향을 미치는 오염물질을 명확하게 파악할 필요가 있는데, 이 때 매체별 특성이 반영된 토양 중 오염물질 농도 분석방법을 마련할 필요가 있다. 우리나라는 토양분석법으로 함량법을 채택하고 있는데, 함량법은 자연기원 불소와 PFAS 내 불소를 한꺼번에 측정하는 방법으로 각각 물질의 지하수 등으로의 용출량을 측정하기는 어렵다.

나. 개선방안

토양과 지하수를 연계할 수 있는 통합적인 관리와 토양오염물질 농도 측정 개선을 위해서는 다음과 같은 방안을 고래해 볼 수 있다.

첫째, 지하수를 취수원으로 사용하는 유럽과 토양-지하수를 연동하여 관리하는 일본의 경우처럼 우리도 함량법과 함께 용출법을 토양분석방법으로 채택하여 오염물질이 타매체에 미칠

96) EIASS환경영향평가정보지원시스템 (<https://www.eiass.go.kr/inform/reference/resourceSite.do>)

수 있는 영향을 함께 고려할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 토양측정망과 지하수 수질측정망이 연계되어 토양지하수정보시스템에 공개되도록 하고, 지하수 수질기준에도 자연기원 불소와 PFAS기준을 분리하도록 하여야 한다. 일본은 정화의 기준을 지하수 수질기준에 맞추도록 하고 있다.⁹⁷⁾ 즉 자연기원 불소로 오염된 토양을 제거할 필요가 있는 경우 요조치구역⁹⁸⁾으로 정하고 토양 위해성평가를 통해 자연기원 불소가 지하수에 미치는 영향을 용출기준으로는 0.8mg/L, 함량기준으로는 4,000mg/kg으로 정하고 있다.

둘째, 위해성평가 산정식에서 지하수섭취 경로에 대한 가중치를 마련하고 식물유효도(Phytoavailability in Soil) 평가 등에 요구되는 용출법을 함량법과 함께 사용할 수 있어야 한다.⁹⁹⁾ 일본은 노출경로를 지하수 섭취와 직접 섭취로 규정하고 있는데, 우리나라는 토양섭취, 농작물섭취, 지하수섭취, 토양접촉, 실외비산먼지흡입까지로 다양하게 보고 있어 단순히 비교하기는 어렵다. 실질적으로 지하수섭취와 직접섭취 항목을 토양접촉 및 실외비산먼지흡입과 동일한 가중치를 두어 계산하고 있어 지하수섭취로 인한 위해성을 낮게 평가할 수 있다.

셋째, 토양분석방법의 개선방안은 현재 농업계에서 연구조사를 위해서 사용하고 있는 「농업과학기술 연구조사분석기준」을 검토하여 함량법과 함께 용출법도 토양분석방법으로 정하도록 할 필요가 있다. 이를 통해 자연계에서 발생하는 불소가 지하수에 미치는 영향을 고려하는 분석방법이 필요할 것으로 보인다.

VI. 나가며

토양관리는 환경보전과 지속가능한 농업을 위해 매우 중요한 요소이다.

토양은 사람이 생활하면서 밀접하게 접촉하는 매체일 뿐만 아니라 지하수, 지표수 및 대기 등 과다 상호 연관되어 있다. 따라서 토양이 토양오염물질에 의해 오염될 경우 오염부지 자체에 대한 관리도 중요하지만, 오염된 부지로 인해 영향을 받을 수 있는 주변 환경에 대한 고려도 필요하다. 이와 함께 건강한 토양은 작물 생산성 향상에 필수적이기 때문에 환경보전과 함께 토양환경을 영위하는 농업에 대한 고려도 필요하다.

이에 1995년 토양에 대한 기본법적 성격의 「토양환경보전법」을 제정한 후 토양오염물질을 관리하고 있었으며 본 보고서에서 중요하게 논의한 불소도 이러한 연장선 상에서 토양오염물질로 관리를 시작한 2002년부터 전세계에서 가장 강하게 규제해 오고 있다.

97) <https://www.env.go.jp/water/dojo/pfas.html>(土壤中のPFOS、PFOA及びPFHxSに係る暫定測定方法溶出量試験)

98) 要措置区域(第6条) 汚染の摂取経路があり、健康被害が生ずるおそれがあるため、汚染の除去等の措置が必要な区域

99) 要措置区域(第6条) 汚染の摂取経路があり、健康被害が生ずるおそれがあるため、汚染の除去等の措置が必要な区域

우리나라 토양광물에는 자연기원 불소의 농도가 높고, 급속한 산업화와 집중적인 토지이용으로 잠재적 인공기원 불소도 많을 것으로 추정되나 두 물질이 함께 관리되고 있다는 한계가 있음에도 관련 규정에 대한 세심한 고려가 부족한 상황이다.

이유를 살펴보면 「토양환경보전법」이 1995년 제정된 이후 변화하는 토지이용 규제를 반영하여 개정되지 못하였고, 인공기원 불소를 포함하는 신규오염물질 관리를 위한 「화학물질관리법」 또한 2015년에 시행되었기에 ‘불소’를 강하게 규제함에도 불구하고 이 중 정작 관리해야 하는 인공기원 불소는 관리되지 못하고 있다. 토양은 흔히 「토양환경보전법」뿐 아니라 「지하수법」, 「물환경보전법」, 「먹는물관리법」 등 환경부 관련 법률과 깊이 연계되어 있고 확대해 보면 농업 관련 법률과의 연관성도 밀접하나 관리하는 조직과 부처가 다르다는 이유로 연계되어 검토되기 어려웠다.

2018년 국토교통부에서 관리하던 지하수가 정부의 물관리일원화로 환경부로 이관되었으나 정부는 토양과 지하수를 연계하는 방안을 내놓지 못하고 있다. 이는 지하수뿐 아니라 다른 물 환경도 마찬가지이고, 농업환경과의 연계방안도 부족한 상황이다.

이에 향후 보고서에서 제안한 방안이 인체 건강을 위한 위해성평가뿐 아니라 농업환경도 고려할 수 있도록 합리적인 토양 내 불소관리 체계가 마련되길 기대해 본다.

참고문헌

- * 대한민국 전자관보, 「환경부령제1134호(토양환경보전법 시행규칙 일부개정령)」, 2024.12.12.
- * 국무조정실 국무총리비서실 보도자료, 「규제심판부, “국민기업에 부담되는 불소규제, 국제적 수준에 맞게 개선해야”」, 2023.9.25.
- * 환경부 보도설명자료, 「불소의 토양오염기준을 인체 및 환경에 위해가 없는 범위 내에서 합리적으로 조정할 예정」, 2023.10.17.
- * 환경부 보도설명자료, 「불소의 토양오염우려기준을 합리적으로 개선하겠음」, 2023.11.2.
- * 식품안전정보원, 「국제암연구소, 과불화화합물 발암성 평가... PFOA를 '인체발암물질(1군)'로, PFOS를 '인체발암가능물질(2B군)'로 분류」, 2023.12.2.
- * 보건복지부 보도자료, 「수불사업 시행지역 아동충치 예방효과 ‘탁원’ - 「수돗물 불소농도 조정사업」효과 조사 연구결과 -」, 2024.1.10.
- * 대한치과의사협회, 「불소함유치약의 사용에 대한 예방치과연구회의 지침」
- * 수돗물불소화반대 2001 전국대회 자료집, 「수돗물불소화를 우려한다」
- * 연합뉴스, 「불소 검출로 김포시립도서관 공사 1년 중단…제도 개선 건의」, 2023.6.28.
- * 국토일보, 환경초대석(한국토양정화업협동조합), 2023.12.15.
- * 연합뉴스, 「토양 내 불소 정화 기준 완화…시행규칙 개정안 입법예고」, 2024.8.29.
- * 김경민, 「토양환경 이력관리제도 도입을 위한 현황과 과제」, 『이슈와 논점』 국회입법조사처, 2016.10.7.
- * 국립환경과학원, 「토양오염기준 설정체계선진화 방안 연구」, 2013.
- * 국립환경과학원, *J. Soil Groundwater Environ.*, 「토양 중 불소 분포 및 거동 특성 평가」, 2018.
- * 환경부 보도자료, 「환경부 수돗물 수질감시 강화 수질감시항목 4종 신규 지정, 총 32항목으로 확대」, 2018.5.30.
- * 「식품의 기준 및 규격」
- * 「CODEX 가이드라인」
- * 환경부, 「국내외 사례 심층 분석을 통한 불소 토양 기준 적정성 평가 연구-최종보고」, 2023.2.15.,
- * 김경민, 국회입법조사처 이슈와 논점, 「환경오염피해 구제에 관한 법률안의 주요 내용과 개선과제」, 2013.7.24.
- * 한국농어촌경제연구원, 「독일 토양환경정책」, 해외농업·농정포커스, 2015.9.16.
- * 일본 환경성 발표자료, 「토양오염대책법 개요, 시행현황 및 토양 환경행정의 최신

동향」, 2022.10.25.

- * 국제환경규제 사전대응 지원시스템(COMPASS), 「일본, 138종의 PFOA 관련 화합물 금지 제안」, 2024.9.23.
- * 연합뉴스, 「낙동강 원수·정수서 발암물질 과불화화합물 미량 검출」, 2020.7.7.
- * 글로벌환경신문, 「부산 수돗물 이대로 절대 안돼!, 또 물금취수장 발암물질 과불화 화합물 등 검출」, 2022.4.12.
- * <https://www.eiass.go.kr/inform/reference/resourceSite.do>
- * Saxena, V.K. and S. Ahmed(2003) Inferring the chemical parameters for the dissolution of fluoride in groundwater.
- * Singh, G., B. Kumari, G. Sinam, Kriti, N. Kumar, S. Mallick(2018) Fluoride distribution and contamination in the water, soil and plants continuum and its remedial technologies, and Indian perspective –a review., CEPA(1996)
- * National ambient air quality objectives for hydrogen fluoride (HF), Science assessment document., . Ayoonb, S. and A.K. Gupta(2006) Fluoride in drinking water: A review on the status and stress effects.
- * Jha, S.K., V.K. Mishra, D.K. Sharma, and T. Damodaran(2011) Fluoride in the environment and its metabolism in humans. In: D.M. Whitacre(ed.)(2011) Reviews of environmental contamination and toxicology.
- * Edmunds, W.M. and Smedley, P.L., 2013, Fluoride in natural waters, Essentials of medical geology, pp.311–336.
- * IARC, 「Perfluorooctanoic acid and perfluorooctanesulfonic acid」, Monographs, Vol. 135., 2023.11.
- * IARC. IARC monographs on the identification of carcinogenic hazards to humans, Agents classified by the IARC monographs, Volumes 1–134., 2023.
- * Totsche, K.U., *J. Environ. Qual.*, 「Evaluation of fluoride-induced metal mobilization in soil columns」, 2000.
- * <https://www.epa.gov/risk/regional-screening-levels-rsls-generic-tables>
- * Federal Soil ProtectionandContaminatedSitesOrdinance(BBodSchV)
- * <https://www.bclplaw.com/en-US>
- * Federal Soil ProtectionandContaminatedSitesOrdinance(BBodSchV) date 12 July1999, Verordnungüber BelastungendesBodens(VBBo), BBodSchV 부록1

- * 오염토양처리업무 가이드라인(汚染土壤の処理業に関するガイドライン, 일본환경성, 2019)
- * <https://www.epa.gov/risk/regional-screening-levels-rsls-generic-tables>
- * ALS Global, 「New PFAS regulations are coming: what you need to know」, 2024.4.22.
- * https://dep.nj.gov/wp-content/uploads/srp/rs_by_chemical_fraction.pdf
- * BCLPemerging.com, 「PFAS IN SOIL: STATE REGULATIONS」, 2023.12.4.
- * <https://www.epa.gov/sdwa/and-polyfluoroalkyl-substances-pfas>
- * https://www.epa.gov/system/files/documents/2021-10/pfas-road-map_final-508.pdf
- * <https://ccme.ca/en/summury-table>
- * https://www.gesetze-im-internet.de/bbodschv_2023/anlage_3.html
- * <https://eeb.org/wp-content/uploads/2023/10/PFAS-in-drinking-water-briefing-final-1.pdf>
- * <https://pfas-1.itrcweb.org>
- * <https://echa.europa.eu/hot-topics/perfluoroalkyl-chemicals-pfas>
- * <https://www.env.go.jp/kijun/dojou.html>
- * <https://www.env.go.jp/content/900540064.pdf>
- * <https://www.env.go.jp/water/dojo/pfas.htm>

R E P O R T · L I S T

NARS 현안분석 발간 일람

호수	제목	발간일	집필진
제342호	‘내 집에서 나이들기’를 위한 방문진료 활성화 - 노인의 지역사회 계속 거주(Aging In Place)를 위한 주요 과제 -	2024.12.27.	구슬이 · 양동욱
제341호	만성질환자의 건강결과 개선을 위한 비대면 진료의 효과	2024.12.26.	김은정
제340호	소형모듈원자로(SMR) 안전규제 기준 마련을 위한 과제	2024.12.26.	김나정
제339호	제목약품운전 억제를 위한 「도로교통법」 개정방안	2024.12.19.	김가은
제338호	인공지능 기반 딥페이크에 대한 해외 법제 및 시사점	2024.12.16.	최진응
제337호	2024년 미국 대통령·의회선거 분석	2024.12.16.	송정민·허석재· 송진미
제336호	피의자·피고인 사망과 진실규명	2024.12.13.	이소영
제335호	다크패턴으로부터 온라인 이용자 보호	2024.12.5.	박소영
제334호	대한민국의 인도-태평양 전략에 대한 이행 평가와 과제 - 북방정책과 행정부의 외교·국방 정책에 대한 국회의 통제권 부재 -	2024.11.29.	정민정
제333호	노숙인 복지제도의 문제점 및 개선방안 - 주거·의료·고용 지원제도를 중심으로 -	2024.11.27.	정용제
제332호	마약류 중독자 치료보호체계 구축 방안	2024.10.23.	김은정
제331호	사이버렉카 문제, 어떻게 대응할 것인가?	2024.10.21.	최진응
제330호	AI 디지털교과서 도입에 따른 지방교육재정부담 전망과 과제 - 2025~2028년 AI 디지털교과서 구독료 재정소요를 중심으로 -	2024.10.17.	김범주
제329호	가정 밖 청소년이 쉼터에 입소하지 못하는 이유 - 청소년쉼터 입소 절차 입법개선 시급 -	2024.10.7.	허민숙
제328호	인구감소지역 복수주소제 도입의 가능성과 한계	2024.9.23.	하혜영
제327호	학생의 정신건강 실태와 향후 과제 - 「제1차 학생건강증진 기본계획(2019~2023년)」 수립 전·후 비교를 중심으로 -	2024.9.4.	김범주
제326호	AI 디지털교과서의 법적 성격과 입법 과제 - AI 디지털교과서는 어떻게 “교과용 도서”가 되었나 -	2024.8.20.	김범주

호수	제목	발간일	집필진
제325호	금융투자소득세 쟁점과 개선과제 - 주식의 자본이득 및 배당소득에 대한 과세 논의를 중심으로 -	2024.7.24.	이예지
제324호	외국국적동포에 대한 복수국적 허용 - 국적제도의 세계적 추세와 유사 국가 입법례를 중심으로 -	2024.6.28.	김보람
제323호	2023년 전세금반환보증제도 개편의 효과와 향후 임차인 보호방안	2024.6.24.	장경석
제322호	‘거절 살인’, 친밀한 관계 폭력 규율에 실패해 온 이유 - 강압적 통제 행위 범죄화를 위한 입법과제 -	2024.6.4.	허민숙
제321호	남북한 공유하천 이용·관리를 위한 남북 협력 방향	2024.5.29.	정민정·심성은
제320호	바이오헬스산업 육성 등을 위한 의사과학자 양성 과제	2024.5.16.	김은정
제319호	여성할당제 도입 20년: 여성의원 총원패턴의 변화와 지속	2024.5.10.	전진영·송진미·황선주
제318호	양도제한조건부주식, 편법인가 혁신인가? - 미국의 활용례를 통해 살펴본 양도제한조건부주식의 쟁점과 과제 -	2024.3.29.	이수진
제317호	지속가능한 남북관계를 위한 통합연구의 필요성과 국회사법조사처의 역할	2024.3.18.	이승열
제316호	지방소멸 대응책으로 도입된 생활인구 제도 현황과 과제	2024.3.11.	하혜영·임준배
제315호	지배적 플랫폼 사업자의 규제 이슈에 대한 검토	2024.2.05.	최은진
제314호	물관리 분야 기후위기 대응 입법 현황 및 향후 과제 - 홍수, 가뭄 등 수자원 분야를 중심으로 -	2024.1.16.	김진수
제313호	법 집행 기능 회복을 위한 공무원행자 보호 입법 방안 - 합리적 범위를 초과하는 민원 통제를으로 -	2023.12.28.	이재영
제312호	미국의 정당방위 법제와 시사점	2023.12.28.	박소현
제311호	복지멤버십 제도 등 복지 사각지대 해소방안	2023.12.27.	정용제
제310호	국무위원의 국회 출석·답변제도: 국내·외 비교와 과제 - 미국·영국·프랑스·독일·일본 의회를 중심으로 -	2023.12.21.	김태엽
제309호	조세특례 일몰제도 개선방안 - 관행적 일몰 연장에서 벗어나 실효적 일몰제도 정착 필요 -	2023.12.18.	황성필·박윤정
제308호	사무장병원등에 대한 단속의 실효성 확보 방안 - 국민건강보험공단 ‘특별사법경찰’ 도입 필요성을 중심으로 -	2023.12.12.	문심명

호수	제목	발간일	집필진
제307호	인구절벽 대응으로서의 청소년수당 논의 - 호주와 우리나라의 소득지원 제도 비교 및 시사점 -	2023.11.20.	허민숙 박재연
제306호	살인예고 등 불특정 다수에 대한 위협행위 규제 논의의 쟁점	2023.11.15.	이소영
제305호	이스라엘 - 하마스 전쟁: 배경, 전망과 과제	2023.11.14.	김도희·형혁규· 김예경·박명희· 심성은
제304호	항공교통이용자 권익 보호 실태와 개선 과제 - 항공기 지연·결항을 중심으로 -	2023.11.7.	구세주
제303호	교권 보호 4법의 주요 내용과 교육활동 보호의 과제	2023.11.2.	이덕난
제302호	포털뉴스의 평가와 영향: 실증연구에 대한 문헌고찰	2023.10.27.	최진응
제301호	가석방 없는 종신형(終身刑) 제도 도입의 전제	2023.10.19.	김광현
제300호	권역별 비례대표제의 조건과 효과에 대한 검토	2023.8.10.	고원 정치발전 제도개선 T/F
제299호	「분산에너지 활성화 특별법」 제정의 의의와 향후 과제	2023.8.9.	유재국
제298호	영상콘텐츠 산업 관련 세제지원제도의 현황과 향후 과제	2023.7.28.	이예지 황성필
제297호	재난문자방송시스템 운영의 쟁점과 향후 과제 우리나라와 일본의 재난문자시스템 비교	2023.7.24.	배재현
제296호	선출직지방공직자 주민소환제도 현황과 향후 과제	2023.7.21.	하혜영
제295호	만화·웹툰 산업 저작권재산권 양도계약의 제도개선 과제	2023.6.5.	박제웅
제294호	선거제 개편 논의, 왜 침체에 부딪혔나? - 새로운 대안 및 전략에 대한 모색 -	2023.5.31.	고원 정치발전 제도개선 T/F
제293호	시민참여 공론화 해외사례와 시사점(정치발전제도개선 TF)	2023.5.25.	김선화 오창룡
제292호	섬 지역 관리 현황과 향후 과제	2023.5.22.	하혜영
제291호	학교폭력 가해학생 분리조치 집행 지연의 쟁점과 과제	2023.5.10.	이덕난 유지연



NARS 현안분석 제343호
토양 중 불소 관리현황 및
개선방안

